

TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO
JUNHO/2012
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

FORMAS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

Claudio Antonio López López

Orientador: Prof. Dr. José Maria Carvalho Filho
Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE)

Resumo – Este trabalho tem como objetivo apresentar e comparar as diferentes formas de implementação das funções de proteção de motores de média tensão.

Primeiramente, visando entender a finalidade de cada uma das principais funções de proteção, o artigo apresenta uma descrição geral das principais falhas que afetam tais motores e como protegê-los.

Finalmente, o artigo faz o estudo comparativo das funções de proteção disponíveis nos relés, 7SK80, SEL-710 e GE-339, fabricados, respectivamente, pela Siemens, SEL e GE.

Palavras-Chave: Proteção de motores de indução, relés multifunção.

I – INTRODUÇÃO

Os motores de indução são amplamente usados em diferentes processos industriais. Estes motores são geralmente resistentes e confiáveis quando são utilizados sem atingir os seus limites nominais. No entanto, atualmente, os novos motores são projetados para trabalhar muito perto de seus limites operacionais, o que requer um sistema de proteção mais efetivo quando o motor vir a operar sob condições anormais.

Portanto, um sistema de proteção moderno deve proporcionar uma proteção total destes motores. Uma modelagem precisa do sistema térmico tanto do rotor como do estator é necessária para permitir o funcionamento do motor sem ultrapassar os limites térmicos da máquina e ao mesmo tempo, sem restringir a sua capacidade de trabalho.

As características físicas do motor são especialmente importantes para a definição dos ajustes do sistema de proteção. Deve-se considerar as características da corrente de partida do motor em função do tempo, a corrente de rotor travado, o tempo máximo permitido de funcionamento com rotor travado nas condições a frio e a quente, e finalmente, a capacidade térmica do motor para diferentes condições de operação [1].

O relé de proteção ideal deveria enxergar a temperatura exata dos enrolamentos do rotor e do estator do motor e dar ordem de disparo quando o limite térmico da máquina fosse alcançado. Nesse sentido, a impossibilidade de medir a temperatura do rotor de forma exata obriga aos engenheiros de proteção a desenvolver diferentes métodos para superar este problema.

Os novos relés micro processados oferecem soluções de máxima confiabilidade para a proteção de todos tipos de motores de indução, sendo recomendável o seu uso em motores de médio ou grande porte por questões econômicas. No entanto, existem diferenças nas lógicas de implementação das diferentes funções de proteção. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo comparativo das principais funções de proteção de motores disponíveis nos relés, 7SK80, SEL-710 e GE-339, fabricados, respectivamente, pela Siemens, SEL e GE.

II – PRINCIPAIS FALHAS E PROTEÇÕES DE MOTORES DE INDUÇÃO

As falhas em motores de indução podem ser classificadas em: falhas de origem interna e externa.

II.1 – FALHAS DE ORIGEM INTERNA

São falhas dentro dos terminais do motor que podem ser de origem elétrica ou mecânica.

Curto circuitos. As falhas nos enrolamentos do motor podem ser entre as fases ou monofásicas a terra. As funções específicas mais comuns para as falhas monofásicas são as de sobrecorrente de neutro (50/51GS e 50/51N). Para sistemas com neutro conectado a terra mediante uma resistência podem ser aplicadas as funções 50GS (conectado a um TC toroidal), tempo definido, que evita os desequilíbrios das correntes normalmente encontrados na saída dos TCs com conexão residual. Este tipo de proteção oferece grande sensibilidade.

A outra alternativa é a proteção 51N, de tempo inverso, com o objetivo de evitar falsos *trips* devido aos desequi-

lívrios já citados. Entretanto, a proteção (51N) apresenta menor sensibilidade quando comparada a 50GS. No caso de motores de maior porte, onde não é viável utilizar TCs GS devido a seção dos cabos de alimentação, será utilizada a função 50N, tempo definido, que deverá ser cuidadosamente ajustada com *pick-up* superior a corrente desequilíbrio esperada [2].

Para as falhas entre fases poderá ser usada a função 50, quando associada a disjuntor, ou fusíveis, quando associados a contator.

Alem destas funções, a função 87M também oferece proteção contra ambos os tipos de curtos-circuitos, mas só é indicada para aplicações que requerem uma alta sensibilidade e para motores de grande porte, geralmente, com potencia acima de 1200 kW.

Problemas com os rolamentos. A função 38 fornece uma medida real da temperatura dos rolamentos do motor através de RTDs. Caso a temperatura exceda o limite estabelecido, a proteção desligará imediatamente o motor para evitar danos.

II.2 – FALHAS DE ORIGEM EXTERNA

Desequilíbrio de tensão. Este problema causa um incremento da temperatura dos enrolamentos do rotor e estator como consequência da circulação de correntes de sequência negativa I_2 . A função 46 é a proteção específica contra este problema. Mediante a leitura de I_2 estabelece-se um valor de *pickup* e uma temporização adequada, que uma vez superados, o relé comandará o desligamento do motor. Existem alguns fabricantes que incorporam a proteção contra desequilíbrios na função de sobrecarga térmica 49, já que dentro desta função é levado em consideração o efeito de I_2 na modelagem térmica do motor, deixando a critério do engenheiro habilitar a função 46 ou não.

Rotor Travado. O travamento do rotor pode acontecer durante a partida, devido a um torque de carga superior ao torque de partida, ou durante o funcionamento normal, quando ocorre um incremento significativo da carga. A primeira situação é protegida mediante a função 48, temporizada com tempo definido ou tempo dependente, cuja temporização deve ser superior ao tempo de partida e inferior ao tempo de rotor bloqueado do motor.

Para solucionar a segunda situação é usada a função conhecida como 'Load Jam', que atua somente quando o relé detecta sobrecargas significativas.

De forma geral, ambas as situações são protegidas também pela função 49.

Perda de carga. Em determinadas aplicações como bombas, a perda de carga do motor pode ser um indicativo de cavitação ou aquecimento, no caso de bombas refrigeradas pelo líquido que bombeiam. Desta forma, a função 37 estabelece um ajuste abaixo do qual, se persistir por um determinado tempo, o relé ordenará o desligamento do motor.

Sobrecarga. Situações de sobrecarga são protegidas com as funções 49, 49R e 51. A função 49 calcula a capacidade térmica utilizada do motor (estator e/ou rotor) mediante a utilização de diferentes métodos e, uma vez alcançado o patamar de 100%, comanda o desligamento do motor. Como já citado, esta função protege também contra os efeitos prejudiciais das correntes de sequência negativa (I_2) e contra condições de rotor travado, mas a proteção contra sobrecargas seria a sua aplicação mais específica. A função 49R complementa o funcionamento da função 49 através de medição direta da temperatura do enrolamento do estator através de RDTs.

Subtensão e sobretensão. Motores de indução quando submetidos a subtensões drenam da rede correntes acima dos valores nominais e conseqüentemente podem sobreaquecer [3]. Por outro lado, poderão sofrer danos no isolamento quando submetidos a sobretensões. Proteções específicas para estes casos são a funções 27 e 59, respectivamente.

Rotação ao contrário (back-spin). Em certas aplicações de bombas submersas em plataformas de petróleo (*off-shore*), pode ocorrer fluxo reverso de fluido que faz com que a bomba gire em sentido contrário quando desenergizadas. Sob estas circunstâncias, o motor não deve ser religado [4]. Portanto, esta função bloqueia a reenergização do motor até que motor esteja efetivamente parado.

Repartida em condições não desejáveis. Em função de parâmetros do motor como: capacidade térmica usada do motor no momento do seu desligamento, capacidade térmica que será requerida para a repartida, tempo mínimo entre partidas ou o número máximo de partidas por hora, a maioria dos relés disponibilizam a função 66 que bloqueia a reenergização até que as condições adequadas sejam restabelecidas no motor.

A título de ilustração, a Figura 1 apresenta um esquema típico de proteção utilizado em motores de média tensão.

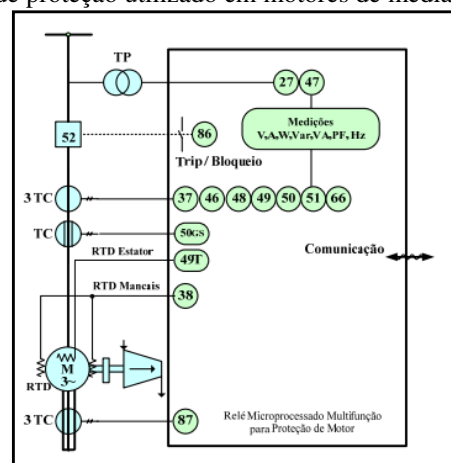


Figura 1.- Exemplo de aplicação de relé de proteção multifunção em motores de média tensão.

III – ESTUDO COMPARATIVO

Nesta seção será apresentado um estudo comparativo das formas de implementação das principais funções de pro-

teção de motores de indução de média tensão, tomando como referência os relés *GE-339*, *7SK80* e *SEL-710*, fabricados, respectivamente, pela *GE* [3], *Siemens* [5] e *SEL* [6].

III.1 – FUNÇÃO TÉRMICA (49)

Relé 7SK80

A função utiliza as possibilidades computacionais do microprocessador para calcular a temperatura do **estator** resolvendo a equação diferencial (1).

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{\tau_{th}} \cdot \theta = \frac{1}{\tau_{th}} \cdot \left(\left(\frac{I}{k \cdot I_{Nom}} \right)^2 + \theta_{u'} \right) \quad (1)$$

Onde:

θ : temperatura atual referida à máxima sobre temperatura final com máxima corrente de fase permitida $K \cdot I_{Nom}$

τ_{th} : constante de tempo térmica do motor

I : valor rms atual de corrente de fase

k : fator para indicar a maior corrente constante permitida em relação à corrente nominal

I_{Nom} : corrente nominal do motor

O termo $\theta_{u'}$ é definido pela equação (2).

$$\theta_{u'} = \frac{\theta_u - 40^\circ C}{k^2 \cdot \theta_N} \quad (2)$$

Onde:

θ_u : temperatura do meio ou refrigeração.

θ_N : temperatura do estator para corrente nominal.

O último termo (2) só é calculado se a proteção recebe informações da temperatura ambiente obtidas dos RTDs.

A função prevê uma correção da constante de tempo térmica em função das condições de funcionamento do motor (parado ou girando) mediante um fator corretivo (k_{th}), que será incrementado em situações de menor capacidade de transferência de calor da máquina para o meio ambiente (motor parado).

Esta função disponibiliza sinais de alarme com a finalidade de oferecer proteção preditiva de funcionamentos anormais. Estes sinais podem ser emitidos quando a porcentagem de temperatura programada é superada ou para valores de correntes anormais. Além disso, emitir-se-á ordem de disparo quando for superado o nível de 100% da capacidade térmica.

Para garantir que esta função não comande o desligamento do motor com tempos extremamente curtos devido a correntes de curto circuito, a replica térmica é inibida para correntes maiores às de partida ($I_{MotorStart}$).

Finalmente, o bloqueio da função pode ser obtido de forma direta ou em situações de partidas de emergência.

Relé SEL-710

O relé oferece duas formas de proteger o motor termicamente.

No primeiro modelo (*Rating Method*), é calculada uma curva térmica baseada na corrente nominal do motor (I_n), no fator de serviço (FS), na constante de tempo de funcionamento (RTC), na corrente de rotor travado (I_{LR}), no fator de aceleração (TD), no escorregamento nominal (s_n) e no torque de rotor travado (Q_{LR}). O relé disponibiliza um modelo térmico dependente do escorregamento, o que caracteriza uma representação térmica mais exata do ro-

tor, permitindo reduzir os tempos entre partidas e consequentemente, aumentando a disponibilidade operacional do equipamento. Esta é uma das características mais significativas deste relé cujo ganho operacional pode ser observado na Figura 2.

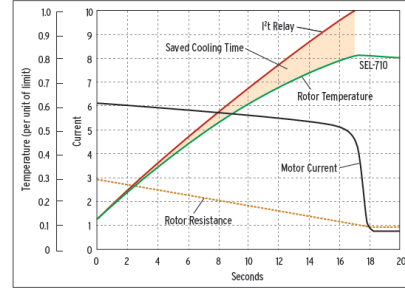


Figura 2.- Margem extra de funcionamento oferecido pelo relé SEL-710

Também pela Figura 2 observa-se que a resistência do rotor é dependente do escorregamento. Na partida ($s=1$) esta resistência assume um valor igual a três vezes o valor da resistência à velocidade nominal ($s \approx 0$).

O relé desenvolve dois modelos (rotor e estator) independentes baseados em circuitos térmicos equivalentes da máquina para dois estados diferentes: partida ($I > 2.5 \cdot I_N$) e funcionamento nominal ($I < 2.5 \cdot I_N$). Para cada um destes estados, as contribuições para o aquecimento devido às correntes de sequência positiva e negativa (I_1 , I_2) são ponderadas.

As curvas geradas também são sensíveis a variações da temperatura de refrigeração do motor, que serão medidas pelos RTDs. A função oferece a possibilidade de emitir um alarme preditivo e comando para desligamento quando for superado 100% da capacidade térmica do rotor ou estator.

O segundo modelo (*Curve Method*) habilita a possibilidade de selecionar uma das 45 curvas térmicas disponíveis ou implementar uma curva específica inserida ponto a ponto pelo engenheiro. Neste caso, o relé calcula de forma automática os valores de corrente de rotor travado, o máximo tempo permitido para esta corrente em temperatura de funcionamento ($LRTHOT$), o fator de aceleração e a constante de tempo de funcionamento. No caso de selecionar este método, o incremento da temperatura na partida não é considerado, fornecendo proteção só no estado de funcionamento normal. No momento de selecionar o tipo de curva deve-se considerar que um incremento do número de curva supõe um incremento de 2.08 segundos para $I_{LR} = 6 \cdot I_N$ no $LRTHOT$, conforme equação (3).

$$N^\circ \text{ curva} < \frac{\left(\frac{I_{LR}}{I_N} \right)^2 \cdot LRTHOT (s)}{36,208} \quad (3)$$

Onde:

$N^\circ \text{ curva}$: Curva de proteção selecionada

I_{LR} : Corrente de rotor travado

I_N : Corrente nominal do motor

$LRTHOT$: máximo tempo permitido em condições de rotor travado em condições de funcionamento

A seleção do método vai determinar a precisão do modelo térmico. Assim, no caso que seja selecionado o 'Rating Method' será implementado um modelo mais preciso que levará em consideração o aquecimento durante a partida. A seleção do método dependerá da precisão requerida para a proteção do motor, o que deve ser avaliado pelo engenheiro.

Bloqueio térmico

O elemento térmico fornece, além das utilidades anteriores, um bloqueio da partida no caso de que as capacidades térmicas usadas para a partida do rotor e do estator sejam maiores que a capacidade disponível no momento do desligamento do motor. A capacidade necessária na partida pode ser ajustada ou calculada pelo relé como 1,15 vezes a média das últimas cinco capacidades usadas nas partidas pelo rotor e o estator. Estes ajustes adicionais podem ser desabilitados.

Função térmica por termistores 49R

No caso do relé da SEL, a função 49R é uma função independente da função 49, dando resposta a problemas como variação da temperatura ambiente ou obstrução na refrigeração e levando em conta exclusivamente a proteção do estator do motor.

A função calcula a capacidade térmica segundo a equação (4).

$$TCU_{49R} = \frac{(RTD_{estator} - RTD_{ambiente})}{RTD_{ajuste} - RTD_{ambiente}} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

TCU_{49R} : capacidade térmica calculada pelo relé

$RTD_{estator}$: temperatura máxima dos termistores colocados nos enrolamentos do estator

$RTD_{ambiente}$: temperatura do ambiente medida

RTD_{ajuste} : temperatura máxima permitida pelos enrolamentos do estator

A função possibilita ativar um sinal de alarme se a temperatura do ambiente for superior a 60 °C e existe uma diferença superior a 10% em favor da capacidade térmica da função 49R em relação a 49. Isto indica que o motor está tendo uma perda de capacidade de resfriamento significativa.

Finalmente, a função 49R permite emitir sinal de alarme e dá ordem de disparo quando é alcançado 100% da capacidade térmica do estator.

Relé GE-339

O elemento térmico calcula a capacidade térmica usada pelo motor baseando-se no seu estado operacional (partida ou funcionamento normal) e no valor da corrente equivalente I_{eq} medida como um único modelo equivalente da máquina.

Esta corrente equivalente tem como objetivo modelar tanto o efeito de I_1 como de I_2 no aquecimento do motor. Assim, a corrente é calculada segundo a equação (5).

$$I_{eq} = I_{avg} \cdot \sqrt{1 + k \cdot \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2} \quad (5)$$

Onde:

I_{eq} : corrente equivalente responsável pelo aquecimento do motor

I_{avg} : média das correntes das fases em relação a I_N

k : ajuste do nível de desequilíbrio

O ajuste de k pode ser realizado de forma típica ou conservativa

O ajuste típico é expresso segundo a equação (6).

$$k = \frac{175}{I_{LR}^2} \quad (6)$$

Já, o ajuste conservativo é definido pela equação (7).

$$k = \frac{230}{I_{LR}^2} \quad (7)$$

As capacidades térmicas usadas serão calculadas segundo as equações (8) e (9).

i. $I_{eq} > I_{pickup}$ (Incremento da temperatura)

$$TCU_i (\%) = TCU_{i-1} + \frac{3 \cdot T_{system}}{Time\ to\ Trip} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde TCU_i e TCU_{i-1} são as capacidades térmicas no tempo 'i' e 'i-1', T_{system} o período correspondente a frequência de rede e $Time\ to\ Trip$ é o tempo até o disparo da proteção que será calculado em função do estado do motor.

ii. $I_{eq} < I_{pickup}$ (Refrigeração)

$$TCU_i (\%) = TCU_{i-1} + (TCU_{ss} - TCU_{i-1}) \cdot \frac{3 \cdot T_{system}}{Cool\ Time} \cdot 100 \quad (9)$$

Sendo $Cool\ Time$ a constante de tempo de refrigeração em funcionamento ou parado e TCU_{ss} a temperatura de equilíbrio alcançada sob condições de funcionamento com carga constante abaixo do $pickup$ de sobrecarga. Este valor é calculado segundo a expressão (10).

$$TCU_{ss} (\%) = I_{eq} \cdot (1 - HRC) \cdot 100 \quad (10)$$

Sendo a HRC a relação entre o tempo de rotor travado a quente e a frio (t_{LRHOT}/t_{LRCOLD}).

Para finalizar o processo de cálculo, obtém o $Time\ to\ Trip$, que será obtido em função da condição operacional do motor. Se o motor estiver partindo utiliza-se (11) e em funcionamento normal (12).

$$Time\ to\ Trip = t_{LRcold} \cdot \frac{I_{LR}^2}{I_{eq}^2} \quad (11)$$

$$Time\ to\ Trip = \frac{N^o\ Curva \cdot 87,4}{I_{eq}^2 - 1} \quad (12)$$

Função térmica por termistores 49R

O elemento térmico não contempla situações em que a temperatura ambiente esteja alta, o que dificulta a capacidade de resfriamento do motor, ocorrendo um incremento de temperatura não contabilizado. A função 49R pode corrigir estas situações forçando a capacidade térmica da função 49 a adotar o maior valor das temperaturas registradas pelos RTDs conectadas ao estator.

A função 49R trabalhará de acordo com a curva base de TCU dependente da temperatura conforme Figura-3, onde são definidos três parâmetros chave:

- RTD_{minimum} : temperatura mínima, tipicamente correspondente à temperatura ambiente (40 °C).
- RTD_{Center} : temperatura de transição que representa a temperatura do motor para I_n .
- RTD_{maximum} : temperatura máxima permitida nos enrolamentos do estator.

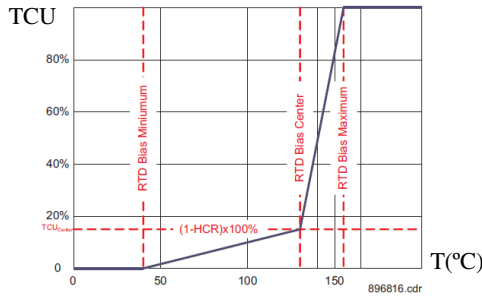


Figura 3.- Regiões de funcionamento da função 49R

Se a temperatura máxima dos $RTDs$ for menor que RTD_{minimum} , nenhum valor será alterado. Por outro lado, se a temperatura for maior que RTD_{maximum} , 100% da capacidade térmica está sendo ultrapassada. Finalmente, se a temperatura máxima dos $RTDs$ está na região intermédia, o valor da capacidade térmica utilizada é calculada pela função 49R, TCU_{RTD} , e comparada com o valor da capacidade descrita anteriormente no TCU_{model} , atualizando o modelo com a maior das duas.

A capacidade térmica será calculada em função de cada região da curva, apresentada na Figura 3, onde incide a temperatura máxima dos $RTDs$ de forma proporcional aos coeficientes das retas de cada região.

Finalmente, para proteger contra possíveis erros de medição dos $RTDs$, mesmo tendo superado o 100% da capacidade térmica, esta função não poderá dar ordem de disparo sem verificar que $I_{eq} > I_{pickup}$.

III.2 – FUNÇÃO CARGA (LOAD JAM)

Esta função vai proteger o motor contra aumentos repentinos de carga durante o funcionamento normal que podem causar sérios danos ao rotor e aos elementos mecânicos do motor. Em geral a função térmica oferece proteção contra estas situações, entretanto, a função Load Jam atuará de forma mais rápida.

De forma geral, os três relés objeto do estudo atuam da mesma maneira. Uma vez detectada a condição de funcionamento anormal do motor, quando são observadas correntes de fase superiores aos ajustes de alarme ou *trip*, o relé atuará com a correspondente temporização. No entanto, podem-se observar algumas diferenças de implementação conforme descrição subsequente.

Relé 7SK80

Este relé não trabalha com estados lógicos de funcionamento. Assim, para bloquear a atuação da função durante a partida, utiliza-se um detector de rotor parado em combinação com uma temporização de partida. Este detector consiste numa porta *and* de ausência de corrente ($I < I_{\text{min}}$)

e posição aberta do disjuntor. Sob estas circunstâncias, o relé assume que o motor está parado. Quando é detectado um aumento da corrente acima do ajuste estabelecido ($I > I_{\text{min}}$) e é verificado que o disjuntor está fechado (partida), ativa-se uma temporização (tipicamente o dobro do tempo de partida normal) para inibir o funcionamento desta função.

Relé SEL-710

A detecção do estado do motor é realizada mediante uma combinação de portas lógicas conforme Figura 4. Se o disjuntor está fechado ($52A=1$) ou a soma das correntes ($I_1 + I_2$) está entre 10% da corrente nominal mínima FLA_{min} e 110% da corrente nominal FLA_n , uma temporização de 300 ms é ativada para garantir a estabilidade destas condições. Após este tempo, se o motor está em regime de partida ($STARTING=1$), o estado passa a ser de funcionamento normal ($RUNNING=1$) já que o biestável L3 terá a saída em nível alto. Quando o motor para ($STOPPED=1$), o estado de funcionamento normal é resetado ($RUNNING=0$) e bloqueado até que o motor volte a operar ($STOPPED=0$).

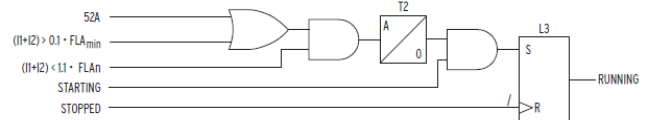


Figura 4.- Lógica de controle do estado Running

Relé GE-339

Neste caso, se o relé está em 'starting' e detecta-se uma corrente menor ou igual que I_n , o estado passa a ser funcionamento normal e o bloqueio da função é inibido. O relé permite dar alarme ou desligamento, não os dois.

III.3 – FUNÇÃO INIBIÇÃO DE REPARTIDA (66)

O objetivo desta função é impedir a repartida do motor quando este não está preparado por diferentes motivos. Trata-se, de uma função de proteção que atua de forma preventiva evitando sucessivas atuações de outras funções, caso fosse permitido tentar ligar o motor novamente em condições inadequadas.

A função é desabilitada se uma repartida de emergência é ativada.

Relé 7SK80

Este relé desenvolve uma réplica térmica do rotor através das correntes do estator e calcula o limite térmico do rotor assumindo que tal limite depende da corrente nominal de partida I_{Nstart} , o máximo tempo permitido na partida T_{start_max} e do número de partidas permitidas a frio n_{cold} ou a quente n_{hot} .

Quatro elementos vão determinar o bloqueio da repartida. Em primeiro lugar, a função calcula o limite térmico de repartida $\theta_{Restart}$ segundo a expressão (13).

$$\theta_{Restart} = \left(\frac{I_{Nstart}}{I_N \cdot k_R} \right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{(n_{cold}-1) \cdot T_{start_max}}{\tau_R}} \right) \quad (13)$$

Onde k_R é um fator de correção interno e τ_R a constante de tempo térmica do rotor.

Se a temperatura da réplica térmica for maior que este limite, o relé não permitirá a repartida.

Também é usado um tempo de equilíbrio T_{eq} para permitir a equalização da temperatura nas diversas partes do rotor. Durante este tempo, a réplica térmica é paralisada para permitir este processo e a repartida não é permitida. Finalmente, o relé calcula o tempo de repartida como mostrado na equação (14).

$$T_{Restart} = K_{t \text{ cold or hot}} \cdot \tau_R \cdot I_N \cdot \left[\frac{\Theta_{pre} \cdot n_{cold}}{n_{cold} - 1} \right] \quad (14)$$

sendo:

$K_{t \text{ cold or hot}}$: correção para refrigeração a frio ou a quente.

Θ_{pre} : temperatura da réplica térmica no momento do disparo.

τ_R : constante de tempo térmica do rotor, calculada internamente.

Independentemente do limite térmico calculado pelo relé, alguns fabricantes de motores obrigam que se espere um tempo mínimo entre partidas, T_{min} , depois que um certo número de tentativas de repartida seja ultrapassado. Com estes tempos, o tempo total de repartida será o máximo entre T_{min} e $T_{Restart} + T_{eq}$, o que garante uma repartida em condições de segurança. A Figura 5 mostra graficamente o que foi explicado.

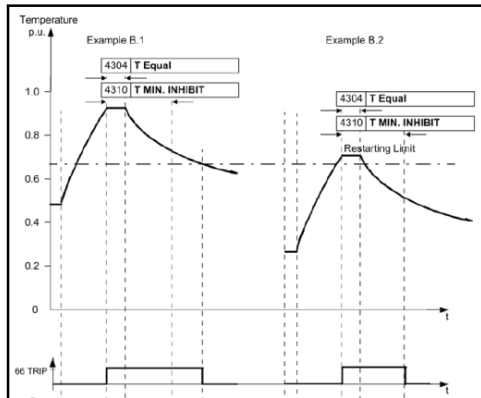


Figura 5 - B.1: $T_{min} < T_{eq} + T_{restart}$; B.2: $T_{min} > T_{eq} + T_{restart}$

Além do bloqueio explicado acima, a função oferece uma proteção térmica do rotor de maneira que no caso que a temperatura da réplica seja maior que o 100% da capacidade térmica, o relé dá ordem de disparo instantâneo.

Relé SEL-710

Este elemento bloqueia a ordem de repartida com três parâmetros: tempo mínimo entre partidas, tempo de proteção contra *back-spin* e número máximo de repartidas por hora. No primeiro caso, alguns fabricantes de motores fornecem o tempo mínimo de segurança entre partidas do motor. Assim, se o motor desliga sem que este tempo tenha transcorrido, a função bloqueia a repartida durante este tempo, desde a última partida.

Se a temporização de *back-spin* é ativada, o relé bloqueia a repartida durante este tempo cada vez que o motor for desligado.

Finalmente, se num intervalo de tempo de 60 minutos é alcançado o número máximo de partidas por hora e o motor é desligado, não será possível a sua reenergização até que transcorram outros 60 minutos desde a última partida.

Relé GE-339

O relé da GE oferece os mesmos três bloqueios da SEL com princípio de funcionamento exatamente igual, porém, acrescido do bloqueio térmico.

O funcionamento do bloqueio térmico é similar ao apresentado pela SEL na função térmica 49. O relé faz a média das últimas cinco capacidades térmicas requeridas para a partida do motor $TCU_{medstart}$. Além disso, define-se um valor da capacidade estimada ajustada pelo engenheiro $TCU_{eststart}$. A capacidade que o algoritmo do relé considera necessária para a repartida está definida na equação (15).

$$TCU_{start} = TCU_{medstart} \cdot \left(1 + \frac{TCU_{eststart}}{100} \right) \quad (15)$$

Se a capacidade disponível for menor que TCU_{start} a função bloqueará a repartida do motor até que a condição necessária seja atendida.

III.4 – FUNÇÃO DE SUPERVISÃO DE TEMPO DE PARTIDA (48)

Relé 7SK80

A função 48 deste relé não só protege contra situações anormais de partida como também oferece proteção contra rotor travado em condição normal de funcionamento.

Para a proteção durante a partida, a função estabelece tempos de disparo mediante um elemento de sobrecorrente inverso segundo a expressão (16).

$$t_{trip} = \left(\frac{I_{Nstart}}{I} \right)^2 \cdot t_{max \text{ start cold/warm}} \quad (16)$$

Onde:

t_{trip} : tempo até o disparo da função

I_{Nstart} : corrente nominal no arranque

I : corrente real medida

$t_{max \text{ start cold/warm}}$: tempo máximo permitido na partida com o motor a frio ou a quente.

A função troca automaticamente de $t_{max \text{ start}}$ mediante uma relação entre n_{cold} e n_{warm} (arranques a frio e a quente) inserida na função 66, sendo que para um correto funcionamento da função 48, a função 66 também deve estar habilitada. Assim, estabelece-se o parâmetro θ_L segundo a equação (17).

$$\theta_L = \frac{n_{cold} - n_{warm}}{n_{cold}} \cdot 100 \quad (17)$$

Quando a réplica térmica do rotor da função 66 supera este valor efetua-se o cambio de $t_{max \text{ start}}$.

Para a proteção contra rotor travado a função dispõe de um temporizador (ajustado com o tempo máximo de rotor travado permitido) e de um detector de velocidade do rotor. Se a temporização for atingida e se o sensor de velocidade indicar que o rotor está parado, a função comandará a ordem de desligamento imediato.

Relé SEL-710

O funcionamento da função 48 deste relé é baseado no estado operacional do motor e no $t_{max\ start}$. Se o tempo de partida do motor superar $t_{max\ start}$, o que só pode ocorrer durante a partida do motor, a função comandará o seu desligamento.

Relé GE-339

O funcionamento deste relé é semelhante a do relé SEL-710.

III.5 – FUNÇÃO DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO (46)

Esta função protege o motor de forma específica contra aquecimentos no rotor e no estator devido a circulação de correntes desequilibradas.

Relé 7SK80

O relé fornece proteção contra este tipo de distúrbio com característica de atuação tempo definido ou tempo inverso. Esta função fica ativada para uma faixa de corrente de fase entre 10% e 1000% da corrente nominal I_N . O elemento de tempo definido é caracterizado por dois valores de *pickup* e duas temporizações associadas. Uma das características mais interessantes deste relé, aplicável nesta função, é a possibilidade de estabilizar os valores de *pickup* com sinais intermitentes. Tempos ajustáveis (T_{DOUT}) solucionam este problema conforme mostra a Figura 6.

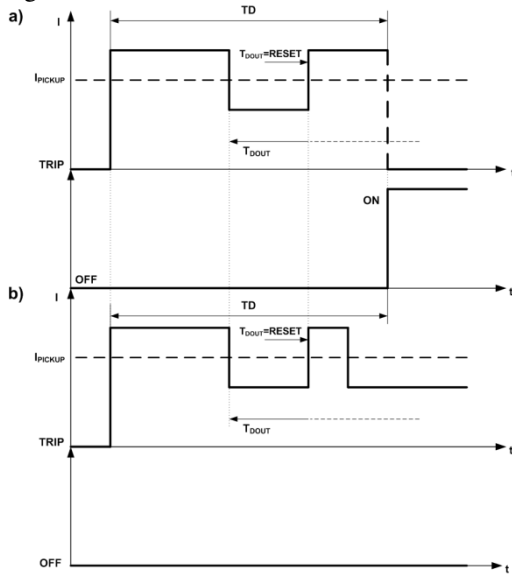


Figura 6.- Funcionamento do Time Drop Out

Na ausência de T_{DOUT} , quando a corrente ficar abaixo do ajuste I_{pickup} o TD será resetado. Com esta temporização o TD continua ativado até o final do tempo estabelecido. Caso que neste instante o ajuste seja ultrapassado, o relé comandará o disparo imediatamente.

Sem esta opção e na presença de desequilíbrios intermitentes, a função 46 não daria ordem de disparo, porém, o motor estaria sofrendo aquecimento.

O elemento de tempo inverso utiliza curvas normalizadas IEC ou ANSI. Dois valores de *pickup* devem ser definidos. O primeiro deles ativa a curva de tempo inverso para sobrecorrentes de sequência negativa (I_2) e o segundo

limita o tempo de resposta da função 46 com característica tempo definido. O segundo ajuste é usado para prever situações como a alimentação do motor com uma fase desligada (*single phasing*), que corresponde ao caso mais grave de desequilíbrio.

O valor do ajuste deverá ser introduzido no relé segundo a expressão (18) e será comparado com a medida direta de I_2 .

$$I_{2\ pickup} = \frac{I_{2max}}{I_N} \cdot I_N \cdot \frac{I_{CT\ sec}}{I_{CT\ prim}} \quad (18)$$

Onde:

$I_{2\ pickup}$: ajuste de corrente negativa

I_{2max} : máxima corrente de sequência negativa permitida pelo motor

I_N : corrente nominal do motor

$I_{CT\ sec}$: ampères secundários do CT

$I_{CT\ prim}$: ampères primários do CT

Relé SEL-710

São três os fatores que definem esta função: cálculo do nível de desequilíbrio, temporização e faixa de atuação.

O relé calcula o nível de desequilíbrio de duas formas diferentes, conforme equações (19) e (20), dependendo do parâmetro I_{av} , que é a média das correntes de fase.

Assim, se $I_{av} > I_N$:

$$UB\% = \frac{I_m}{I_{av}} \cdot 100 \quad (19)$$

Caso contrário:

$$UB\% = \frac{I_m}{I_N} \cdot 100 \quad (20)$$

Onde:

I_m : $\max\{|I_{max} - I_{av}|, |I_{min} - I_{av}|\}$

I_{max} : $\max\{|I_a|, |I_b|, |I_c|\}$

I_{min} : $\min\{|I_a|, |I_b|, |I_c|\}$

I_{av} : $(|I_a| + |I_b| + |I_c|)/3$

I_N : corrente nominal

O objetivo desta diferenciação é evitar alarmes desnecessários devido aos ruídos dos sinais quando o motor está levemente carregado.

Entretanto, esta função só atuará quando I_{av} for maior que 0,25 vezes I_N .

A função compara a porcentagem de desequilíbrio, em cada caso, com os ajustes de alarme e desligamento. O comando de desligamento ocorrerá após ter transcorrido um tempo superior ao ajuste estabelecido.

Relé GE-339

Neste caso, também é feita uma diferenciação no cálculo do nível de desequilíbrio através da utilização das equações (21) e (22) para evitar os problemas já explicados.

Quando $I_{av} \geq I_N$

$$UB\% = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100 \quad (21)$$

Caso contrário:

$$UB\% = \frac{I_m}{I_{av}} \cdot \frac{I_{av}}{I_N} \cdot 100 \quad (22)$$

O relé possui uma forma específica de detectar problemas de desequilíbrios severos, quando da ocorrência de perda

de uma das fases (*single-phasing*). Se o nível de desequilíbrios for maior que 40% ou quando I_{av} é maior ou igual que 0,25 vezes I_N e a corrente de qualquer fase for menor que a corrente mínima de desligamento (I_{min}), a função 46 emitirá ordem de desligamento com um retardo de 2 segundos.

III.6 – FUNÇÃO DE SOBRETENSÃO (59)

A função 59 protege nos três casos analisados contra sobretensões que podem causar danos relevantes nos isolamentos do motor.

É de vital importância estabelecer a forma de medição das tensões no relé (fase-neutro ou fase-fase) para evitar graves erros no funcionamento da função 59.

Relé 7SK80

Esta função tem dois elementos de tempo definido para proteger o motor: um contra sobretensões severas e o outro contra sobretensões mais brandas. O primeiro elemento será temporizado com um tempo pequeno, no caso de sobretensões maiores, e o outro com temporização mais elevada para situações de menor risco. O valor de *dropout* é ajustável para esta função.

O relé permite monitorar tanto tensões fase-fase como fase-neutro.

Relé SEL-710

Para proteger contra este evento, a função 59 possui uma unidade de desligamento por tempo definido e outra de alarme. A função obtém o valor da maior tensão de entrada (fase-fase ou fase-neutro) e compara este valor com cada um dos ajustes estabelecidos.

Relé GE-339

A função permite trabalhar sob três modalidades. Na primeira delas, '*any one*', o elemento passa a estar ativo se a tensão em qualquer das entradas (fase-fase ou fase-neutro) ficar acima do valor de *pickup*. Na segunda, '*any two*' só haverá ativação se a tensão em duas entradas superar o ajuste estabelecido e na terceira, '*all three*' a tensão das três entradas deverão ficar acima do valor de *pickup*. A escolha de qual modalidade ficará a critério do engenheiro que estabelecerá o grau de permissividade da função frente a sobretensões.

III.7 – FUNÇÃO DE SUBTENSÃO (27)

Relé 7SK80

Neste relé é permitido diferenciar entre a conexão da proteção do lado da fonte e do lado da carga.

Quando o relé é colocado do lado da fonte, seu princípio de funcionamento é tido como normal. Se a tensão ficar abaixo do valor de *pickup* inicializa-se a correspondente temporização que acabará em disparo se a condição de subtensão for mantida. Neste caso, a função não tem problema de *dropout* já que conectada do lado da fonte, quando a tensão de alimentação retornar a um valor adequado o relé permitirá que o motor seja energizado novamente.

No entanto, se a proteção for colocada do lado da carga pode acontecer um problema com o *dropout*, ou seja, se o relé só utilizar o nível de tensão como *input*, este nunca sairia da ativação já que uma vez aberto o disjuntor, a tensão no lado da carga será zero. Para sanar este problema, é utilizada uma monitoração da corrente. Quando a função está ativa é verificado que a corrente está abaixo de um certo valor o que garante que o motor não tem corrente (I_{min}), permitindo que o disjuntor seja fechado novamente, conforme ilustrado na Figura 7.

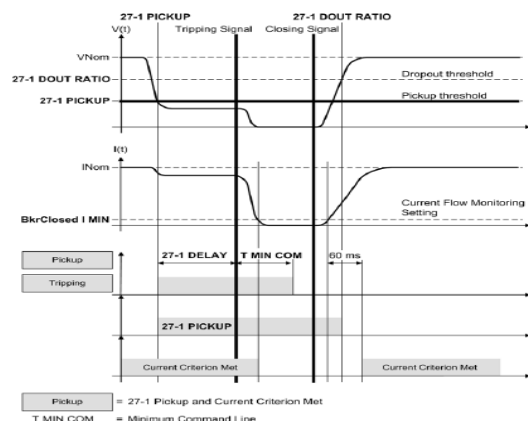


Figura 7.- Funcionamento da função 27 instalada no lado da carga

Relé SEL-710

O funcionamento da função 27 corresponde ao inverso do usado na função 59. O relé calcula a mínima tensão entre as três entradas (fase-fase ou fase-neutro) e compara com os valores de *pickup* de alarme e desligamento.

Relé GE-339

Várias diferenças caracterizam a forma de implementar esta função quando comparado com os outros relés. Em primeiro lugar, a função permite estabelecer uma característica de disparo de tempo inverso segundo a expressão (23).

$$T = \frac{D}{1 - \frac{V}{V_{pu}}} \quad (23)$$

Sendo:

T: tempo de operação

D: ajuste que define o tipo de curva

V: tensão como uma fração da tensão nominal do secundário do TP.

V_{pu} : valor de pickup.

Alem disso, esta função inibe o funcionamento de outras funções como sobre e sub frequência e oferece a possibilidade de transferência de fonte de alimentação.

III.8 – FUNÇÃO DE MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DOS ROLAMENTOS (38)

Trate-se de uma das funções mais específicas do motor. Pretende-se com esta função evitar danos irreparáveis resultantes de ruptura dos rolamentos.

O relé mede a temperatura dos rolamentos mediante a utilização de termistores (RTDs). Em função do número

de RTDs usados é possível configurar a proteção com um nível para alarme e outro para desligamento. Tanto o relé *SEL-710* como o *GE-339* oferecem esta função, que não está disponível para o relé *7SK80*

III.9 – FUNÇÃO DE PERDA DE CARGA (37)

Relé 7SK80: Não oferece esta função.

Relé SEL-710

O relé deve garantir que o motor atinja a condição de funcionamento nominal.

Durante a partida um temporizador é acionado, que bloqueará a função 37 até que tempo de partida transcorra. Expirado este tempo, relé assume que o motor passou a operar na condição de funcionamento normal.

Os níveis de corrente das fases são comparados com os valores de *pickup* de alarme e desligamento, que possuem as suas correspondentes temporizações. Caso a condição de operação a vazio se mantenha, o relé atuará dando alarme ou desligamento.

Os valores de *pickup* desta função devem ser estabelecidos abaixo da corrente mínima de funcionamento normal e acima da corrente a vazio I_0 do motor.

Relé GE-339

O princípio de funcionamento deste relé é exatamente o mesmo do relé *SEL-710*.

III.10 – ANÁLISE COMPARATIVA

Para facilitar a visualização, a análise comparativa entre os relés foi sintetizada sob a forma de tabelas.

Na Tabela 1 são apresentados os problemas mais comuns que afetam os motores de média tensão juntamente com as principais funções de proteção disponibilizadas pelos respectivos relés.

Tabela 1- Funções de Proteção Disponibilizadas pelos Relés

	7SK80	SEL-710	GE-339
Rotor travado na partida	48	49	49
Rotor travado em funcionamento	48/L J	L J	L J
Sobrecarga térmica estator	49	49	49
Sobrecarga térmica rotor	66	49	49
I_2	46	46/49	46/49
Inibição capacidade térmica partida	66	49	66
Supervisão de partida	48	48	48
Sobretensão	59	59	59
Subtensão	27	27	27
Supervisão No máximo de partidas/h	-	66	66
Supervisão Tempo mínimo entre partidas	66	66	66
Back-spin	-	66	66
Emperramento da carga	Load Jam	Load Jam	Load Jam
Temperatura dos rolamentos	-	38	38
Perda de carga	-	37	37

De forma complementar, nas Tabelas 2 a 8 são apresentadas as variações das formas de implementação das diversas funções de proteção encontrados os três relés estudados.

Tabela 2- Variações da Função 49

Proteção	Varian-tes	7SK80	SEL-710		GE-339		
		49	49 Ra-ting	49 Cur-ve	49R	49	49R 49+ 49R
Partida contra rotor travado		Não	Sim	Não	Não	Sim	Não Sim
Bloqueio em repartidas		Não	Sim	Não	Sim	Não	Não
Correntes I_2		Não	Sim	Sim	Não	Sim	Não Sim
Proteção rotor		Não	Sim	Sim	Não	Sim	Não Sim
Proteção estator		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Correção da temperatura ambiente		Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim Sim
Modelo dependente de 's'		Não	Sim	Não	Não	Não	Não
Modelos independentes do rotor e estator		Não	Sim	Não	Não	Não	Não

Tabela 3- Variações da Função Load Jam

	7SK80	SEL-710	GE-339
Bloqueio partida	$I_{MIN} + \text{TIMER}$	Estado lógico	Estado lógico
Elementos de disparo	Um bloqueio + Um térmico	Um	Um
Alarme	Sim	Sim	Sim
Alarme +disparo	Sim	Sim	Não

Tabela 4- Variações da Função 66

	7SK80	SEL-710	GE-339
ncold/nhot	Sim	Não	Não
Correção τR	Sim	Não	Não
Estabilização T^a rotor	Sim	Não	Não
Máximas partidas por hora	Não	Sim	Sim
Tempo mínimo entre partidas	Sim	Sim	Sim
Back-spin	Não	Sim	Sim
Limite térmico repar-tida	Analiticamente	-	Aprendizagem 5 últimas partidas + setting

Tabela 5- Variações da Função 48

	7SK80	SEL-710	GE-339
<i>Disparo</i>	<i>Característica de tempo inverso</i>	<i>Timer + Nível de corrente + Estado lógico</i>	<i>Timer + Nível de corrente + Estado lógico</i>
<i>tmax start cold/hot</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
<i>Deteção partida</i>	<i>Imotor start</i>	<i>Estado lógico</i>	<i>Estado lógico</i>
<i>Rotor travado</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>

Tabela 6- Variações da Função 46

	7SK80	SEL-710	GE-339
<i>Sensibilidade a ruídos</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>
<i>Single-phasing</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>
<i>Estabilização Pickup</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
<i>Elemento tempo inverso</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
<i>Elementos tempo definido</i>	<i>Dois</i>	<i>Um</i>	<i>Um</i>
<i>Limite superior funcionamento</i>	$10 \times I_N$	-	-
<i>Limite inferior funcionamento</i>	$0.1 \times I_N$	$I_{AV} > 0.25 I_N$	-
<i>Alarme</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>
<i>Alarme + disparo</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>

Tabela 7- Variações da Função 27

	7SK80	SEL-710	GE-339
<i>Característica de disparo</i>	<i>Tempo definido</i>	<i>Tempo definido</i>	<i>Inversa</i>
<i>Localização</i>	<i>Carga ou alimentação</i>	<i>Alimentação</i>	<i>Alimentação</i>
<i>Bloqueia outras funções</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>
<i>Transferência de fonte de alimentação</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>
<i>Nº elementos de disparo</i>	<i>Dois</i>	<i>Um</i>	<i>Um</i>
<i>Alarme</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>
<i>Alarme +disparo</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>

Tabela 8- Variações da Função 59

	7SK80	SEL-710	GE-339
<i>Pickup</i>	<i>Qualquer uma das tensões de entrada no relé</i>	<i>Máximo das tensões de entrada no relé</i>	<i>Qualquer uma, duas ou as três tensões de entrada</i>
<i>Número elementos de disparo</i>	<i>Dois</i>	<i>Um</i>	<i>Um</i>
<i>Alarme</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>
<i>Alarme +disparo</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>

IV – CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado, constata-se que existe uma gama variada de soluções para proteger os MITs de média tensão, dependendo das atribuições de cada função de proteção e do fabricante do relé selecionado.

Observou-se que a função de proteção mais elaborada é a função 49, que pode contemplar a modelagem térmica do estator e rotor do motor, combinada ou não com medições diretas de temperatura do estator através de RDTs. Esta combinação oferece a possibilidade de corrigir variáveis que se escapam do modelo térmico puro (como a variação da temperatura ambiente), o que confere grande confiabilidade.

Verifica-se que à medida que se aumenta a complexidade da função 49 simplifica-se a forma de implementação de outras como as funções 48, 66 ou Load Jam. Portanto, os modelos térmicos de alto desempenho oferecidos pelos relés SEL-710 e GE-339 cobrem grande parte das exigências de proteção dos MITs de média tensão, liberando de maiores ‘responsabilidades’ tais funções.

O relé 7SK80 oferece opções de proteção que podem garantir a integridade do motor para maioria dos eventos. Entretanto, trate-se de uma proteção mais geral e carece de algumas funções específicas de motores, como a função 38.

A função 87M só é oferecida pelo relé SEL-710, razão pela qual não foi realizada a análise comparativa da mesma.

Contudo, conclui-se que os três relés estudados oferecem proteção eficiente aos MITs, muito embora tenha se verificado diferenças importantes quanto a formas de implementação.

V – AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à Universidade Federal de Itajubá pela oportunidade proporcionada de realizar este trabalho e por me permitir dar um passo a mais na minha formação e evolução pessoal.

Ao professor e orientador Dr. José Maria Carvalho Filho por seu apoio, diretrizes e orientação que foram fundamentais para que este projeto chegasse a um ótimo final. E por suas qualidades pessoais.

Aos colegas conhecidos aqui que contribuíram para que este ano de minha vida seja uma experiência inesquecível.

E finalmente, a minha família pelo amor incondicional que sempre demonstraram.

REFERÊNCIAS

- [1] P.M. Anderson. ‘Power System Protection’. IEEE Press Editorial Board, 1999
- [2] Roberval Bulgarelli. ‘Proteção Térmica de Motores de Indução Trifásicos Industriais’, 2006
- [3] Instruction Manual ‘339 Motor protection System’. General Electric, 2011.
- [4] RIBEIRO, F et al, Um novo conceito em proteção de bombeamento centrifugo submerso, Rio Oil & Gas Expo Conference, Rio de Janeiro, 2000.
- [5] Instruction Manual V 4.6 ‘Motor Protection 7SK80’. Siemens, 2009.
- [6] Instruction Manual ‘SEL-710 Motor Protection Relay’. Schweitzer Engineering Laboratories, 2011.